

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
Ingeniero Eléctrico**

**TEMA:
MODELAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ENTRE UN
SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y UN
SISTEMA CONVENCIONAL**

**AUTOR:
FLAVIO ANDRÉS BARBOSA JARAMILLO**

**TUTOR
CRISTIAN CRISTÓBAL CUJI CUJI**

Quito, Julio 2017

Flavio Andrés Barbosa Jaramillo

**MODELAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ENTRE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y UN SISTEMA
CONVENCIONAL**

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Flavio Andrés Barbosa Jaramillo (Y'1989-M'07). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Don Bosco, se graduó de Técnico Industrial con especialidad Electricidad-Electrónica. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en modelamiento de la producción energética de sistemas fotovoltaicos.

flaviobarbosajaramillo@gmail.com

Dirigido por:



Cristian Cristóbal Cuji Cuji (Y'1986-SM'03). Se graduó de Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2014 y Master en Energía, Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid – España en 2015. Actualmente es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. Miembro del Grupo de Investigación Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).

ccuji@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2017 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría, fue desarrollado el trabajo de titulación **MODELAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ENTRE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y UN SISTEMA CONVENCIONAL**, realizado por Flavio Andrés Barbosa Jaramillo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, Julio 2017




Cristian Cristóbal Cuji Cuji

Cédula de identidad: 1718002221

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Flavio Andrés Barbosa Jaramillo, con documento de identificación N° 1719142901, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “MODELAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ENTRE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y UN SISTEMA CONVENCIONAL”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Nombre: Flavio Andrés Barbosa Jaramillo

Cédula: 1719142901

Fecha: Julio 2017

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. CARACTERIZACIÓN DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS Y UNA ALTERNATIVA PARA LOGRAR LA CONCENTRACIÓN.	3
2.1. RESULTADOS DE LABORATORIO.	3
2.2. EFECTO TÉRMICO.	4
2.3. FACTOR DE FORMA.....	4
2.4. OPCIONES DE CONCENTRACIÓN.....	5
2.5. ENERGY PAY BACK TIME	6
3. ANÁLISIS DEL RECURSO ENERGÉTICO SOLAR.....	6
4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA.....	8
4.1. APLICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS.....	10
4.2. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	11
5. CONCLUSIONES	12
6. REFERENCIAS.....	13
6.1. ESTADO DEL ARTE	16

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i>	Comparación entre sistemas fotovoltaicos.	3
<i>Figura 2.</i>	Curvas características de las células fotovoltaicas.	4
<i>Figura 3.</i>	Factor de forma de la celda fotovoltaica convencional.	5
<i>Figura 4.</i>	Factor de forma de la celda fotovoltaica concentrada.	5
<i>Figura 5.</i>	Estructura de un módulo de alta eficiencia [26].	6
<i>Figura 6.</i>	Comparación número de paneles entre sistema convencional y concentrado [26].	6
<i>Figura 7.</i>	Radiación solar del año 2015.	7
<i>Figura 8.</i>	Radiación solar del mes más alto y bajo.	7
<i>Figura 9.</i>	Radiación solar del día 24/12/2015 y 06/05/2015.	7
<i>Figura 10.</i>	Representación esquemática del conjunto a simular.	10
<i>Figura 11.</i>	Potencia del anual generada y real.	10
<i>Figura 12.</i>	Potencia del día 24/12/2015 generada y real	10
<i>Figura 13.</i>	Potencia del día 06/05/2015 generada y real	11
<i>Figura 14.</i>	Potencia del 12/2015 generada y real.	11
<i>Figura 15.</i>	Potencia del 05/2015 generada y real.	11
<i>Figura 16.</i>	Potencia entre sistema convencional y concentrado.	12

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores obtenidos de la práctica sobre la celda solar.....	5
Tabla 2: Características técnicas del panel convencional.....	9
Tabla 3: Características generales del panel convencional.....	9
Tabla 4: Características técnicas del panel Concentrado.....	9
Tabla 5: Características generales del panel Concentrado.....	9
Tabla 6: Error calculado	12

MODELAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ENTRE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y UN SISTEMA CONVENCIONAL

Resumen

El presente trabajo muestra los resultados de la comparación entre la producción energética de un sistema fotovoltaico de alta eficiencia y un sistema convencional. El objetivo es dar a conocer las diferencias de los sistemas de generación fotovoltaica utilizando datos reales de radiación solar, temperatura de las fotocélulas del año 2015, obtenidos gracias a la central de generación fotovoltaica “Gran Solar”, ubicada en la parroquia de Salinas, provincia Imbabura, Ecuador, y al software de modelamiento y simulación Matlab/Simulink, se procedió al ingreso de las características técnicas de los paneles convencionales y los paneles de alta eficiencia para observar la producción energética de los diferentes paneles.

El modelo está comprobado con datos reales de potencia generada por lo que brinda una ayuda para futuros trabajos sobre el comportamiento, eficiencia, producción energética y número de paneles a instalar entre los sistemas de alta eficiencia y sistema convencional.

A futuro el sistema de alta eficiencia plantea una solución para disminuir el costo de la energía fotovoltaica, por medio de la concentración del sol.

Palabras Clave: Eficiencia, Concentrador fotovoltaico, Matlab/Simulink, Sistema fotovoltaico, Panel solar, Radiación solar.

Abstract

The present paper presents the results of the comparison between the production of a high efficiency photovoltaic system and a conventional system.

The objective is to make known the differences of the photovoltaic generations systems by using real data of solar radiation, temperature of the photocells on the year 2015, obtained thanks to the photovoltaic generation center “Gran Solar”, located in the city of Salinas, province Imbabura, Ecuador, by the modeling and software Matlab/Simulink, the technical characteristics of conventional and high efficiency panels were introduced to observe the energy production of the different panels.

The model is proven with real data of power generated, which provides an aid for future works on the behavior, efficiency, energy production a number of panels to be installed between a high efficiency systems and conventional ones. In the future, the high efficiency systems propose a solution to reduce the cost of photovoltaic energy, by means of the concentration of the sun.

Keywords: Efficiency, (HCPV) High Concentrator Photovoltaics, Matlab/Simulink, Photovoltaic System, Solar Panel, Solar radiation.

1. Introducción

La dependencia del uso de materiales fósiles para la producción de energía eléctrica está provocando un gran daño al medio ambiente y la energía va a ser siempre un factor importante para el desarrollo de un país. Por estos y otros parámetros más, las energías renovables se han convertido en un factor importante para la generación y el cuidado del medio ambiente, en especial la energía solar que se ha incrementado en 20% a un 25% en los últimos 20 años, considerando que la producción fotovoltaica esta entre las tecnologías que necesitan una mayor inversión, pero teniendo presente que es amigable al medio ambiente y no contamina con gases de efecto invernadero [1], [2], [3].

El avance tecnológico a nivel mundial y el crecimiento de la población, han provocado el incremento del consumo eléctrico, los sistemas fotovoltaicos convencionales además de requerir grandes áreas de terreno su eficiencia es baja ya que esta alrededor del 15%, lo cual lleva que este tipo de generación fotovoltaica este quedando en el pasado [4].

La industria fotovoltaica concentra sus esfuerzos para reducir los elevados precios que tienen los paneles solares, incrementando la eficiencia por medio del uso de diferentes materiales [7], dando un nuevo paso a la generación fotovoltaica de alta eficiencia, los cuales han reportado eficiencias mayores al 35%, dando un nuevo paso al futuro de la energía fotovoltaica [3], [8], [9].

La generación fotovoltaica de alta eficiencia utiliza la radiación directa del sol para la producción energética, dentro de los parámetros de generación uno importante y que se va a tratar más adelante es la temperatura, ya que esta influye directamente sobre la eficiencia

del panel fotovoltaico, a medida que la temperatura incrementa la conversión de energía solar a energía eléctrica disminuye. Un panel fotovoltaico de alta eficiencia consiste básicamente en un grupo de celdas solares primarias que son opcionales y un lente óptico, el cual cumple la función de concentrar los rayos solares, mejorando su funcionamiento en comparación con los paneles solares convencionales [10], [11], [12].

A pesar de los diferentes modelos de paneles solares convencionales, no han podido competir contra los de alta concentración, una de las alternativas que poseen estos paneles es un lente de Fresnel, el cuál es el encargado de re direccionar los rayos solares a un punto actuando como un punto focal [13], la luz del sol al pasar por el lente puede obtener un factor de multiplicación de 2 a 1000 soles, un sol es igual a $1000W/m^2$ [14], sobre la celda solar en un rango de 24 grados de inclinación, para el uso de los paneles solares de alta eficiencia es necesarios que estos cuenten con un sistema de seguimiento ya que de esto también depende que las células no se dañen por los rayos solares multiplicados por el lente de Fresnel y enfocados a la célula fotovoltaica [15].

Las diferencias entre los sistemas fotovoltaicos convencionales y de la alta eficiencia son: el rendimiento de cada panel a las mismas condiciones atmosféricas, áreas de instalación del campo solar ya que se utiliza una mayor cantidad de paneles convencionales en comparación con los de alta eficiencia para generar la misma cantidad de energía eléctrica y el consumo de silicio para la manufacturación de los paneles debido a que los paneles convencionales utilizan una gran cantidad de silicio en comparación con los de alta eficiencia como se puede apreciar en la figura 1.

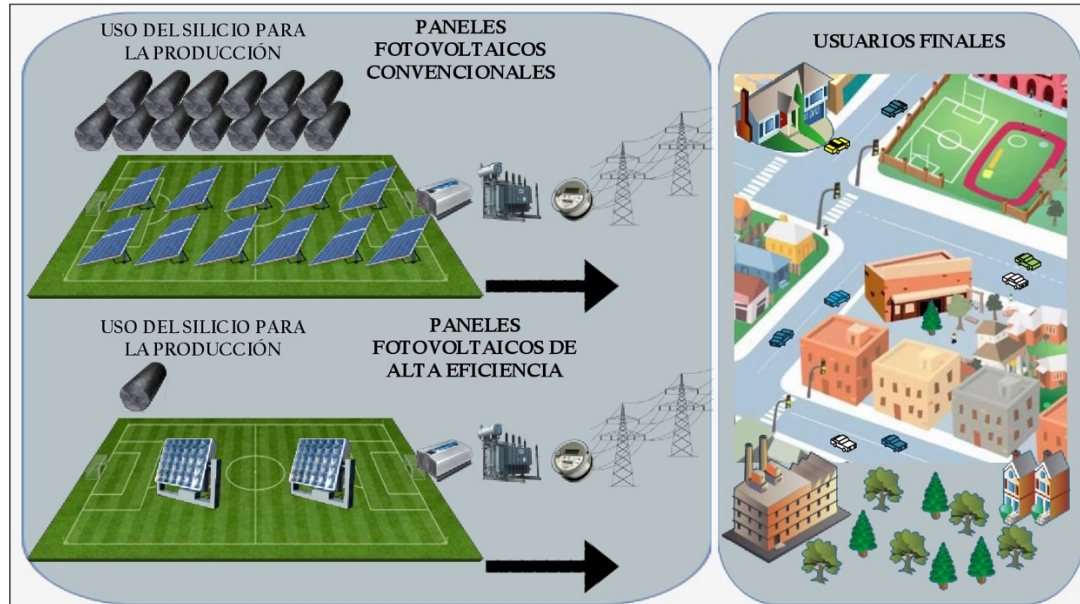


Figura 1. Comparación entre sistemas fotovoltaicos.

Teniendo en cuenta la introducción, en esta investigación se va a realizar un modelo de la producción energética entre un sistema fotovoltaico de alta eficiencia y un sistema convencional, comparándolos entre sí y determinando las ventajas de cada una.

Una vez realizado el modelo se procede a la verificar los resultados con los datos reales de la planta “GRAN SOLAR”, ubicada en Ecuador, Ibarra, por los datos de radiación solar, temperatura de las células fotovoltaicas y la potencia activa en los bornes de generación pertenecen a la misma.

En la siguiente sección se presenta la descripción de la célula fotovoltaica y como una alternativa de concentración al lente de Fresnel, en la sección 3 está el análisis del recurso energético solar, la sección 4 contiene los modelos matemáticos de los diferentes sistemas y las conclusiones en la sección 5.

2. Caracterización de las células fotovoltaicas y una alternativa para lograr la concentración.

Los paneles fotovoltaicos convencionales usan células solares que son fabricados con

semiconductores intrínsecos de silicio policristalino, monocristalino o amorfo [8], [16], mientras que los paneles de alta eficiencia usan células multijunción III-V de tercera generación las mismas que han demostrado una eficiencia de alrededor del 40% [17], el impacto al tener una mayor eficiencia, resulta una gran mejora en comparación con los sistemas de generación fotovoltaica convencionales [18], [4].

2.1. Resultados de laboratorio.

Bajo condiciones controladas de temperatura y luminosidad, la caracterización del funcionamiento de una célula fotovoltaica determinando la curva de corriente/voltaje para comparar los resultados.

Bajo estos parámetros controlados no se afectaron los resultados finales por el efecto térmico, obteniendo los valores de voltaje y corriente para la célula fotovoltaica convencional y de alta eficiencia respectivamente. Para poder simular la célula fotovoltaica de alta eficiencia se adiciono una lupa y espejos emulado un lente de fresnel [19] incrementando la cantidad de luz sobre

la célula fotovoltaica para obtener la curva de caracterización.

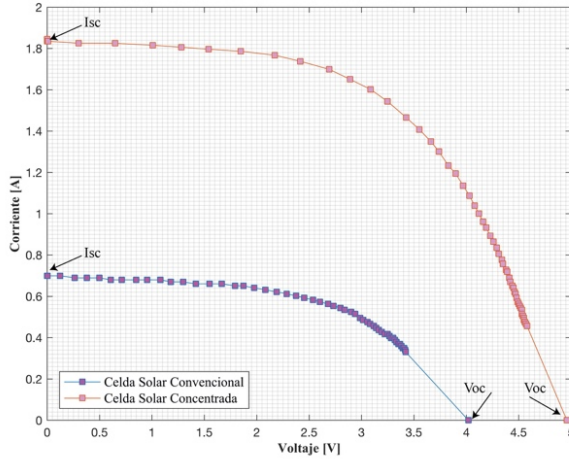


Figura 2. Curvas características de las células fotovoltaicas.

En la figura 2 se observa que la corriente de corto circuito como el voltaje en circuito abierto de la célula fotovoltaica concentrada es mayor a la convencional bajo las mismas condiciones de laboratorio.

2.2. Efecto térmico.

La curva de corriente/voltaje de una célula solar es la superposición de la gráfica del diodo en la célula solar, el efecto térmico es un factor importante ya que al tener una mayor temperatura el rendimiento de la célula va a ser menor [20], [21], [22], esto se puede explicar por lo que la corriente de salida en presencia de luz no es más que la resta entre la intensidad generada y la del diodo [8].

$$I = I_L - I_o \left[e^{\left(\frac{qEV}{\sigma_B T} \right)} - 1 \right] \quad (1)$$

Donde:

I = Corriente de salida (A).

I_L = Corriente fotogenerada (A).

I_o = Corriente de saturación del diodo (A).

T = Temperatura (K).

σ_B = Constante de Boltzmann equivalente $1.381 \times 10^{-23} J/K$.

q_E = Carga del electrón equivalente a $1.602 \times 10^{-19} C$.

V = Voltaje.

A partir de las curvas de características se puede obtener los datos de corriente de corto circuito y de voltaje en circuito abierto los cuales se pueden apreciar en las hojas de datos técnicos de los paneles solares [3], [6].

2.3. Factor de forma.

Se lo conoce también como Fill Factor o factor de llenado, es el resultado de la máxima potencia sobre la potencia total de la celda fotovoltaica, este parámetro puede ser directamente afectado por la resistencia shunt, células fotovoltaicas en serie y pérdidas en los diodos, por lo que determina la eficiencia del sistema [23], [24].

$$FF = \frac{V_{MP} * I_{MP}}{V_{OC} * I_{SC}} \quad (2)$$

Donde:

FF = Factor de Forma.

V_{MP} = Voltaje en el punto de máxima potencia (V).

I_{MP} = Corriente en el punto de máxima potencia (A).

V_{OC} = Voltaje en circuito abierto (V).

I_{SC} = Corriente de corto circuito (A).

Se encontró el factor de forma de la celda fotovoltaica convencional y concentrada, dando la eficiencia de cada célula y demostrando que el rendimiento de la célula concentrada es mayor que la convencional.

En la figura 3 se aprecia la curva de la célula solar convencional donde el factor de forma es la relación entre la potencia máxima y la potencia generada por la corriente de corto circuito y el voltaje en circuito abierto.

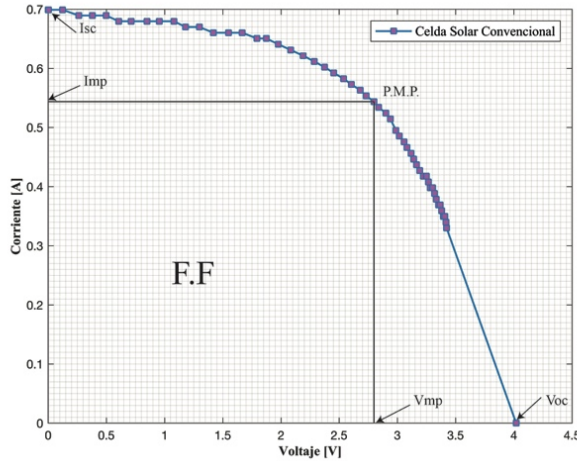


Figura 3. Factor de forma de la celda fotovoltaica convencional.

En la figura 4 está la curva de la célula concentrada donde el factor de forma es mayor que el de la célula convencional, así como el punto de la máxima transferencia de potencia.

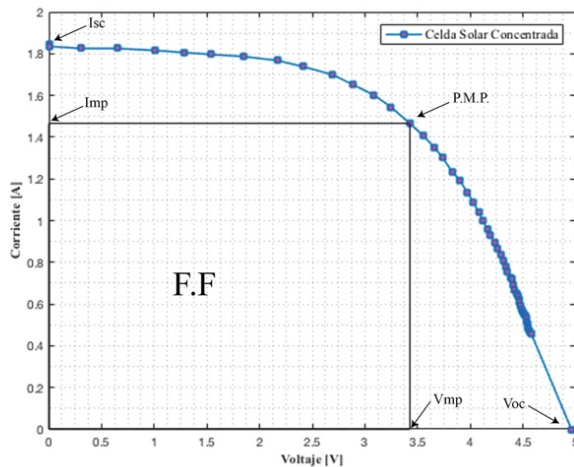


Figura 4. Factor de forma de la celda fotovoltaica concentrada.

Los valores obtenidos a partir de esta práctica son los siguientes en donde se puede verificar lo descrito.

Tabla 1: Valores obtenidos de la práctica sobre la celda solar.

Celda	I_{SC}	V_{OC}	I_{mp}	V_{mp}	PMP
Convencional	0.69A	4.01V	0.54A	2.79V	1.52W
Concentrada	1.84A	4.96V	1.46A	3.42V	5.022W

La eficiencia del panel viene dada por la siguiente fórmula que involucra las variables ya antes definidas [23], [24], [25].

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{\Phi \cdot A} = \frac{P_{MP}}{P_{in}} \quad (3)$$

Donde:

η = Rendimiento.

P_{MP} = Potencia pico de la célula fotovoltaica (W).

P_{in} = Potencia Incidente (W).

Φ = Irradiación solar (W/m^2).

A = Área de la célula solar (m^2).

2.4. Opciones de concentración.

De las distintas formas de concentración en esta investigación se basa en el lente de Fresnel, el mismo que se encuentra dentro de los paneles fotovoltaicos de alta eficiencia, conocidos también como High Concentrator Photovoltaics (HCPV), este actúa como un dispositivo óptico para incrementar la luz del sol sobre la superficie de la célula fotovoltaica con el propósito de incrementar la eficiencia del panel de esta manera reduciendo los costos de la energía generada [26], la reducción del material semiconductor a través de las células de multijunción (MJ) [27] por la eficiencia que poseen [28].

Hay distintos tipos de lentes de Fresnel pero en común el 90% de los rayos del sol son direccionados a la célula solar la cual es de alta eficiencia [29], para este modelo tiene la ventaja de que no necesita una ventilación activa debido a que la célula es de alta eficiencia y como una desventaja se tiene que este lente debe estar siempre perpendicularmente al sol por lo cual es necesario un sistema mecánico adicional para seguir al sol durante el transcurso del día lo que implica un costo de instalación y mantenimiento adicional a la planta solar [29].

Al tener un sistema de seguimiento del sol se incrementa las horas de producción del panel de esta forma compensando los costos adicionales del sistema [30].

Para que un módulo de alta eficiencia esté listo es necesario tener los siguientes componentes:

- Receptor solar.
- Primer Concentrador.
- Segundo Concentrador.

Tal como se muestra en la figura 5.

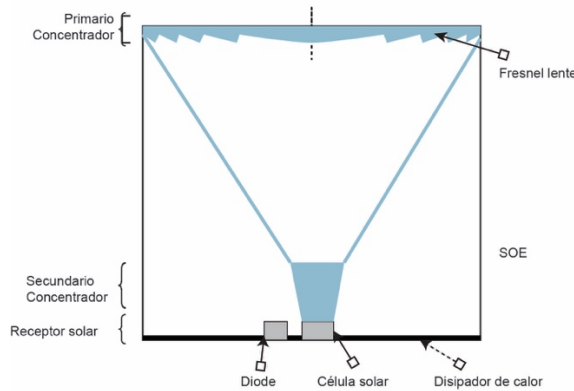


Figura 5. Estructura de un módulo de alta eficiencia [26].

2.5. Energy pay back time

La producción de los paneles fotovoltaicos involucra un alto impacto ambiental por la obtención del silicio como se observa en la figura 6, el mismo que se encuentra de manera natural como un mineral de la arena y es uno de los materiales necesarios para la construcción, sin embargo, la energía solar al ser una energía renovable durante su ciclo de vida actualmente consume grandes cantidades de energía y emite contaminantes durante algunas etapas de su proceso de manufacturación como es la producción de las células fotovoltaicas ya que el silicio debe tener una alta pureza por lo que debe pasar por algunos procesos desde su extracción hasta el producto final, este proceso es conocido como energy pay back time, que en el español tiene la connotación de la energía pagada en el tiempo [5], por lo que los paneles solares concentrados usan una cantidad menor de silicio que los convencionales para generar la misma cantidad de electricidad dando así una posibilidad para disminuir la contaminación durante la

manufacturación de los paneles solares [6].

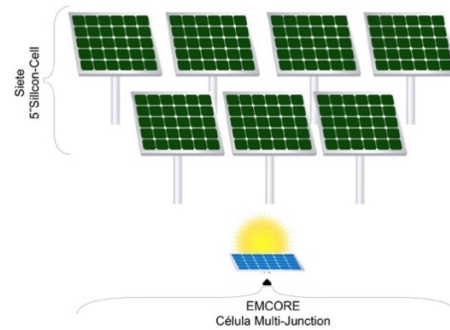


Figura 6. Comparación número de paneles entre sistema convencional y concentrado [26].

3. Análisis del recurso energético solar.

Para realizar la comparación entre los sistemas de generación fotovoltaica se analizó un año de generación de la planta “Gran Solar”, utilizando los datos de radiación solar, temperatura de la fotocélula y la potencia activa del año 2015, para verificar el modelo matemático y determinar la producción energética.

Para el análisis de datos en Matlab se utilizó el siguiente algoritmo:

Algoritmo para procesamiento de datos

```

1: Read variables ( $I_s$ ,  $t$ ,  $T$ ,  $P_{in}$ )
2: While ( $t=\text{día}$ )
3:     Inputs  $I_s$ ,  $T$ ,  $P_{in}$ 
4:     Outputs  $P_{out}$  diaria
5: end
6: While ( $t=\text{mes}$ )
7:     Inputs  $I_s$ ,  $T$ ,  $P_{in}$ 
8:     Outputs  $P_{out}$  mensual
9: end
10: While ( $t=\text{año}$ )
11:     Inputs  $I_s$ ,  $T$ ,  $P_{in}$ 
12:     Outputs  $P_{out}$  anual
13: end
14: Read variables ( $P_{out}$  diaria,  $P_{out}$  mensual,  $P_{out}$  anual)
15:  $e = \left( (P_{in} - P_{out}) / P_{in} \right) * 100$ 
16: if ( $e \leq 5\%$ )
17: end if
18: else (error)

```


El uso de este algoritmo para el proceso de datos ayuda a reducir el error debido al tiempo de adquisición, por parte de los equipos de medición de la planta solar y a la verificación de los datos resultantes del modelo con los reales.

La planta cuenta con 2700 paneles solares policristalinos en arreglos donde existe una radiación solar en promedio de 1000 W/m^2 diarios adquiridos por los cuatro pirómetros inclinados y dos horizontales al igual que la temperatura en las células fotovoltaicas de dos sensores, mientras que la potencia activa es registrada en los bornes de generación de la central Salinas.

Para el estudio se tomó en cuenta la radiación anual, mensual y diaria en donde se obtuvieron los valores más altos y bajos.

En la figura 7 se puede apreciar la radiación solar del año 2015, donde se observa que el mes de mayor radiación es el de diciembre mientras que el mes con una menor radiación solar es el mes de mayo, por lo que se consideró el estudio de estos dos meses.

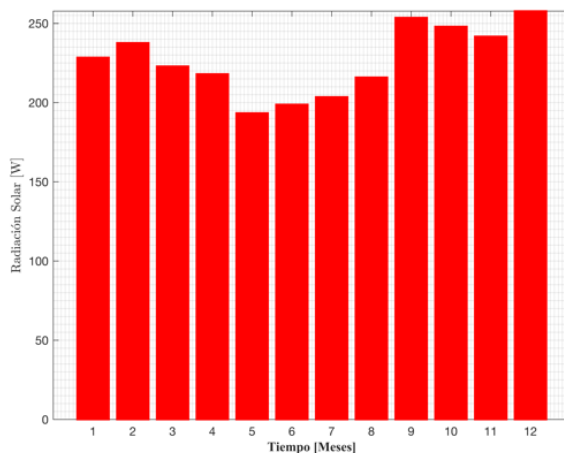


Figura 7. Radiación solar del año 2015.

Una vez que se identifica el mes con mayor y menor radiación solar se procedió a graficar su radiación solar, la figura 8 muestra el comportamiento de los dos meses diariamente por lo que se aprecia los días de máximos y mínimos.

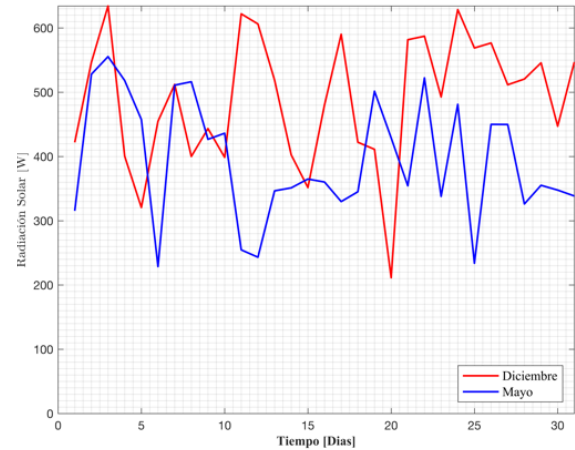


Figura 8. Radiación solar del mes más alto y bajo.

La figura 9 muestra la diferencia de la radiación solar de los días: 24 de diciembre donde se observa que el pico de la radiación supera los 1000 W/m^2 y el 6 de mayo en donde la radiación pico no supera los 400 W/m^2 , donde los valores altos para ambos días van desde las 10h00 hasta aproximadamente las 14h50, mientras que el resto del día tiende a cero ya sea por el amanecer o el atardecer.

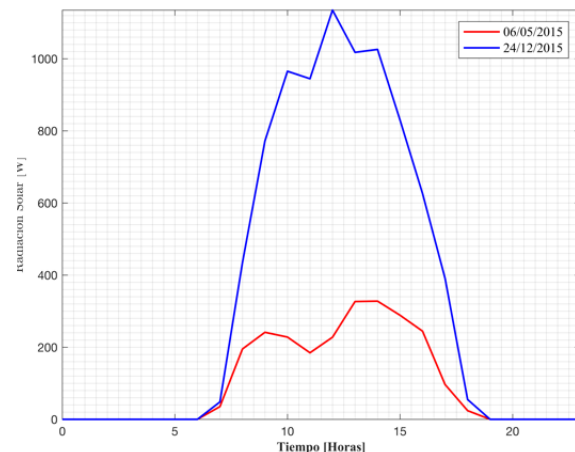


Figura 9. Radiación solar del día 24/12/2015 y 06/05/2015.

El parámetro de la radiación solar puede ser afectado por la humedad y vegetación y montañas cercanas ya que esta puede ocasionar sombra sobre los paneles solares y disminuir su rendimiento [31].

La calidad del aire también es un parámetro importante para la recepción de la radiación solar en cualquier parte del mundo, factores como nubes, smog afectan la radiación solar incidente sobre

el panel, ya que estas partículas absorben la luz del sol [31].

4. Modelamiento matemático de la producción energética.

Con los datos de radiación solar y temperatura de las células fotovoltaicas se procedió a modelar los paneles solares convencionales y de alta eficiencia mediante la ayuda matemática Matlab/Simulink dado que el modelo matemático del panel parte del comportamiento de la célula fotovoltaica y los parámetros eléctricos [32], [33].

$$I = N_P \left\{ I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q_E \left(\frac{V}{N_S} + \frac{R_S I}{N_P} \right)}{m \sigma_B T} \right) - 1 \right] - \frac{\left(\frac{V}{N_S} + \frac{R_S I}{N_P} \right)}{R_P} \right\} \quad (4)$$

Donde:

I = Corriente de salida (A).

I_L = Corriente fotogenerada (A).

I_0 = Corriente de saturación del diodo (A).

T = Temperatura (K).

σ_B = Constante de Boltzmann equivalente $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

q_E = Carga del electrón equivalente a $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

V = Voltaje.

R_S = Resistencia en serie (Ω).

R_P = Resistencia en paralelo (Ω).

m = Factor de idealidad ($0 \leq m \leq 1$)

N_S = Número de celdas fotovoltaicas en serie.

N_P = Número de celdas fotovoltaicas en paralelo.

Los datos de las celdas en serie y paralelo vienen dados por el fabricante del panel solar a condiciones STC, una vez obtenido se debe relacionar con la radiación obtenida, mientras que para la corriente de saturación inversa del diodo se la obtiene mediante una diferencia entre la temperatura real de la célula fotovoltaica y una temperatura referencial equivalente a 298K.

De esta manera obtenemos una expresión más simplificada [32], [33].

$$I = N_P \left\{ I_L - I_0 \left[\frac{q_E (V + I R_S)}{N_S A \sigma_B T} \right] \right\} \quad (5)$$

Donde:

A = Factor de idealidad de los materiales solares ($1 \leq A \leq 5$)

Incluyendo los parámetros de la radiación solar y la corriente de cortocircuito la ecuación (6) se integra al programa [32], [34].

$$I = [I_{SC} + K_i (T - 298)] \frac{\Phi}{1000} \quad (6)$$

Donde:

I_{SC} = Intensidad de corto circuito (A).

K_i = Es la corriente de cortocircuito de la célula igual a $0.0017 \text{ (A/}^\circ\text{C)}$.

Esta ecuación permite simular a un panel convencional, mientras que para el concentrado los valores de la corriente de cortocircuito, el voltaje en circuito abierto van a depender de un nuevo parámetro, el cual es: el número de soles [35].

Las ecuaciones de la corriente de corto circuito (7) y la del voltaje en circuito abierto (8) para las células de alta eficiencia son:

$$I_{SC}(X) = X * I_{SC}(1) \quad (7)$$

Donde:

X = Número de soles.

$I_{SC}(1)$ = Es la corriente de corto circuito a un sol (A).

$$V_{OC}(X) = V_{OC}(1) + \frac{\sigma_B T}{q_e} \ln X \quad (8)$$

Donde:

$V_{OC}(1)$ = Voltaje en circuito abierto a un sol (V).

Remplazando las ecuaciones (7) y (8) en la ecuación (2) tenemos que el factor de forma queda de la siguiente manera [35].

$$FF(X) = \frac{V_{OC} - \frac{\sigma_B T}{q_e} \ln \left(\frac{q_e V_{OC}}{\sigma_B T} + 0,72 \right)}{V_{OC} + \frac{\sigma_B T}{q_e}} \quad (9)$$

Rendimiento finalmente estará definido por la ecuación (10).

$$n(X) = n(1) \left(\frac{FF(X)}{FF(1)} \right) \left(1 + \frac{\frac{\sigma_B T}{q_e} \ln X}{V_{OC}(1)} \right) \quad (10)$$

Con estas ecuaciones se puede modelar el panel solar de alta eficiencia en Matlab/Simulink, este modelo contiene bloques por lo que facilita el ingreso de los datos y entendimiento de las fórmulas.

Para que la simulación sea lo más real posible se ha tomado como datos los paneles reales instalados en la central fotovoltaica Gran Solar, mientras que para los paneles concentrados se han obtenido los datos mediante un catálogo de paneles solares concentrados.

Tabla 2: Características técnicas del panel convencional

Potencia de Salida	P_{max}	W	189,7
Voltaje en P_{max}	V_{mpp}	V	27,6
Intensidad en P_{max}	I_{mpp}	A	6,87
Voltaje en circuito abierto	V_{OC}	V	34,8
Intensidad en corto circuito	I_{SC}	A	7,35

Tabla 3: Características generales del panel convencional

Dimensiones (mm)	Long.	Anchura	Profundidad
	1650	990	40

Como información relevante este panel tiene 60 células solares en serie.

Tabla 4: Características técnicas del panel Concentrado

Potencia de Salida	P_{max}	W	10
Voltaje en P_{max}	V_{mpp}	V	16,8
Intensidad en P_{max}	I_{mpp}	A	0,59
Voltaje en circuito abierto	V_{OC}	V	21,0
Intensidad en corto circuito	I_{SC}	A	0,65
Número de soles	SX		10

Tabla 5: Características generales del panel Concentrado

Dimensiones (mm)	Long.	Anchura	Profundidad
	416	269	17

De igual manera para este panel cuenta con 36 células solares en serie.

Las condiciones STC para ambos paneles son de $1000W/m^2$, temperatura de $25^\circ C$ y una AM de 1.5.

Adicionalmente se realizó el modelo del inversor para simular un sistema conectado a la red, viniendo a ser un seguimiento al punto de máxima potencia, determinando la relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida operando en el punto de máxima potencia dando así la siguiente ecuación [36].

$$n_{inv} = \frac{\frac{P_{CA}}{P_{nom}}}{\frac{P_{CA}}{P_{nom}} + (K_0 + K_1 \frac{P_{CA}}{P_{nom}} + K_2 \left(\frac{P_{CA}}{P_{nom}} \right)^2)} \quad (13)$$

Donde:

n_{inv} = Rendimiento del inversor.

P_{CA} = Potencia de salida del inversor (W).

P_{nom} = Potencia nominal del inversor (W).

K_0, K_1 y K_2 = Constantes de ajuste de la curva de eficiencia.

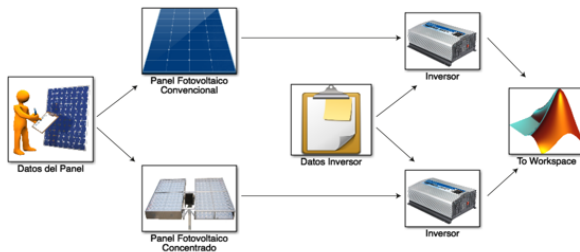


Figura 10. Representación esquemática del conjunto a simular.

En este modelo de bloques realizado en Matlab/Simulink como se muestra en la figura 10 se procede a cargar los parámetros de entrada:

- Radiación solar.
- Temperatura de las células fotovoltaicas.
- Potencia activa.

Mientras que para los datos de cada panel fotovoltaico se ingresan los siguientes parámetros:

- Voltaje en circuito abierto.
- Intensidad de corto circuito.
- Número de células fotovoltaicas en serie.
- Número de células fotovoltaicas en paralelo.
- Número de soles que soporta el panel.

4.1. Aplicación de modelos matemáticos.

Con los datos ingresados se obtiene las curvas de potencia generada por los paneles solares convencionales y los de alta eficiencia, mientras que en la misma gráfica se procede a representar la curva de potencia medida en los bornes de generación.

Para comparar gráficamente la potencia real medidas en los bornes de generación de la planta solar GRAN SOLAR se procede a multiplicar la potencia de salida del inversor del panel simulado en la plataforma de Matlab/Simulink por 2700 ya que esta es la cantidad de paneles solares que se encuentran instalados en la actual planta.

En la figura 11 muestra la potencia real de nuestro sistema siendo comparada con la generada por el modelo matemático en donde el área bajo la curva de las potencias es la energía del sistema fotovoltaico.

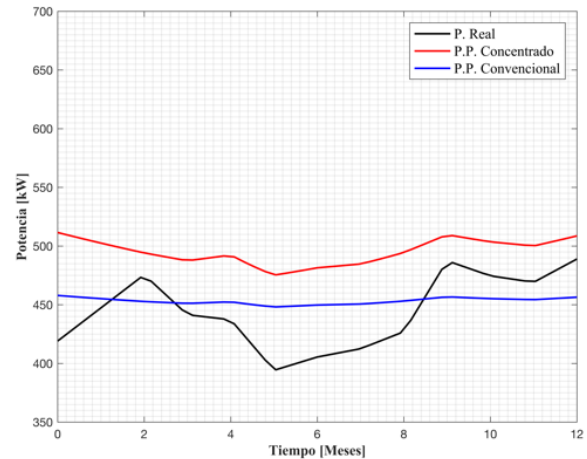


Figura 11. Potencia del anual generada y real

En la figura 12 se ha tomado como referencia el día cuando se tuvo la máxima cantidad de radiación solar por ende se obtuvo la máxima potencia generada, para poder hacer el análisis comparativo y demostrar las diferencias entre los paneles solares convencionales con los de alta eficiencia dando así una producción de cuatro veces superior.

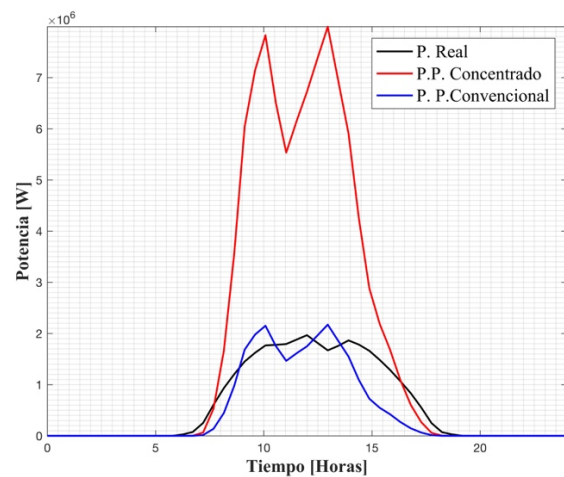


Figura 12. Potencia del día 24/12/2015 generada y real

En la figura 13 se realiza el mismo procedimiento, pero para este caso lo que se hace es tomar como referencia el día en donde hubo la menor radiación solar del año, así dando la peor

producción de energía, pese a esto la tendencia de que el panel concentrado muestra sobre el convencional es superior.

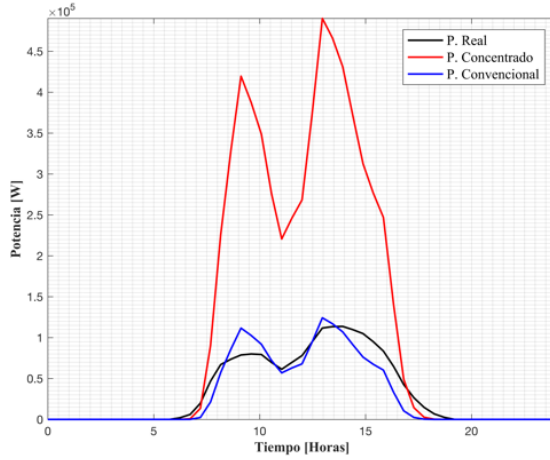


Figura 13. Potencia del día 06/05/2015 generada y real

En la figura 14 los datos son del mes de diciembre ya que es el que mayor radiación solar existió, se aprecia el margen de error que se obtiene del modelo en la comparación de la potencia real con la potencia generada por el modelo del sistema convencional, también se aprecia la potencia entregada por los paneles concentrados superando ampliamente a la potencia del sistema convencional.

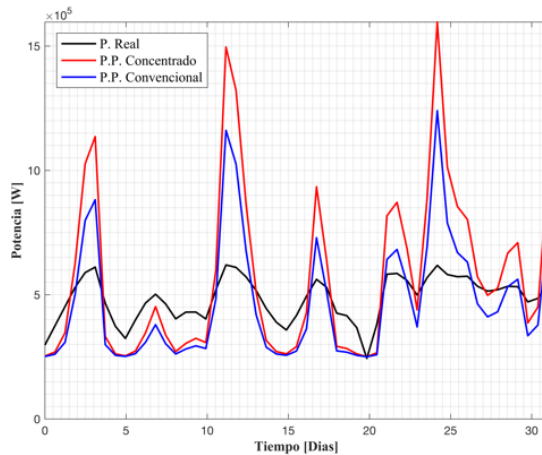


Figura 14. Potencia del 12/2015 generada y real.

En la figura 15 se modela el mes de mayo por ser el mes con menor radiación solar del año 2015, en donde se aprecia que la potencia entregada en los bornes de generación de la central Gran Solar es parecida a la potencia

generada por el modelo matemático del panel solar convencional, mientras que la potencia entregada por los paneles de alta eficiencia superan por un 40% adicional al convencional usando el mismo número de paneles en ambos casos.

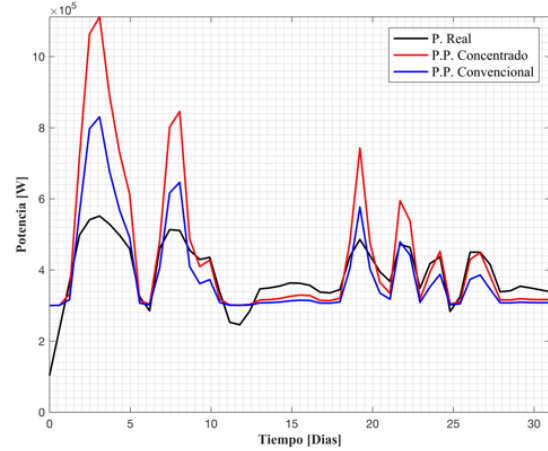


Figura 15. Potencia del 05/2015 generada y real.

4.2. Validación de los resultados.

Validando el modelo realizado en Matlab/Simulink, lo que se ha propuesto es comparar la producción energética de los paneles solares convencionales para de esta manera tener una certeza de que el modelo cumpla.

La energía se la calculo por medio del área bajo la curva de potencia en el tiempo [36], [22].

$$E = \int_0^t f(x) dx \quad (14)$$

Donde:

E = Energía en (W/h).

t = Intervalo de tiempo en el cual se desea calcular la energía, esto en el día es de $0 \leq t \leq 24$, en el mes $0 \leq t \leq 31$ y al año $0 \leq t \leq 12$.

$f(x)$ = Es la curva de potencia generada por nuestro modelo matemático y la potencia real del sistema fotovoltaico.

Para el cálculo de error entre la energía real versus calculada es la siguiente.

$$e = \left(\frac{E_{real} - E_{cal}}{E_{real}} \right) * 100 \quad (15)$$

Donde:

e = Error en porcentaje.

E_{real} = Energía real.

E_{cal} = Energía obtenida por el modelo.

Así tenemos la siguiente tabla con los errores obtenidos en las simulaciones del modelo matemático Matlab/Simulink.

Tabla 6: Error calculado

Simulación anual	2,05	%
Simulación del mes 12/2015	2,33	%
Simulación en el mes 05/2015	0,54	%
Simulación del día 24/12/2015	1,78	%
Simulación del día 06/05/2015	1,80	%

Una vez demostrado que el modelo Matlab/Simulink funciona adecuadamente tenemos la certeza de que el modelo del panel de alta eficiencia de igual forma se encuentra realizado de una manera correcta, así avalando los resultados obtenidos en las gráficas.

Con la comparación entre los dos diferentes sistemas de generación solar con un panel convencional y un panel con concentración X10 se obtiene la gráfica 16, donde se observa que el pico de potencia del panel concentrado esta entre el rango de 200W a 300W, mientras que para el concentrado los valores pico oscilan entre 1000W y 1200W demostrando una mayor producción de energía, a iguales condiciones atmosféricas.

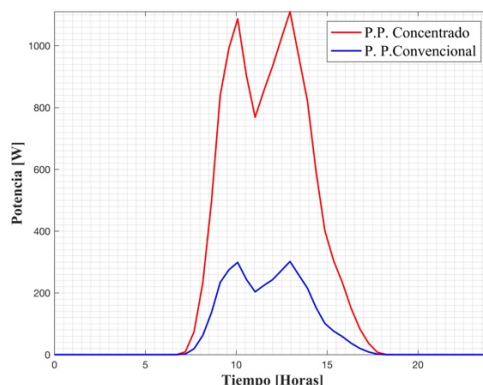


Figura 16. Potencia entre sistema convencional y concentrado.

5. Conclusiones

Realizado la comparación de los diferentes sistemas fotovoltaicos se asegura que el rendimiento de los paneles concentrados es superior al convencional, por su construcción y al aumento del número de soles dando apertura a una nueva tecnología superior de generación fotovoltaica.

La eficiencia de ambos paneles está relacionada con la temperatura de las células solares por lo que hay que tener presente, cuando se usa lentes de Fresnel de una capacidad de multiplicación de soles considerable se debe considerar la instalación de un sistema de refrigeración de las células solares ya que estas pueden bajar drásticamente su eficiencia, también estas pueden sufrir facturas internas abriendo el circuito dentro de los paneles y afectar al rendimiento del sistema negativamente.

Al ser obligatorio el uso de un sistema de seguimiento del sol para la implantación de los paneles solares de alta eficiencia esta va a incrementar el costo de construcción y mantenimiento de la planta solar, pero estos costos se van a ver reducidos debido a que la cantidad de paneles fotovoltaicos concentrados es menor que los paneles convencionales, afectando al terreno donde estará la planta solar será menor, economizando por la eficiencia de los paneles concentrados, y al tener una menor cantidad de paneles instalados estamos dejando una menor huella de carbono ya que al usar menos silicio para la construcción de estos paneles estamos generando menor emisión de gases de invernadero por el ciclo de vida del material y de esta manera estamos haciendo que la energía fotovoltaica sea más amigable al medio ambiente.

Como resultado del estudio, un beneficio que se obtuvo es la generación del modelo matemático en

Matlab/Simulink de un sistema de generación fotovoltaica convencional y de alta eficiencia, con los parámetros de radiación solar, temperatura, V_{OC} , I_{SC} editables para servir como una herramienta para poder predecir el comportamiento de un panel bajo condiciones climatológicas y técnicas específicas.

6. Referencias

- [1] J. G. Elerath, M. Spencer, and S. Horne, "Demonstrating reliability in HCPV systems," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 003547–003552, 2011.
- [2] M. S. Guney, "Solar power and application methods," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 776–785, 2016.
- [3] N. Xu, J. Ji, W. Sun, W. Huang, J. Li, and Z. Jin, "Numerical simulation and experimental validation of a high concentration photovoltaic / thermal module based on point-focus Fresnel lens," *Appl. Energy*, vol. 168, pp. 269–281, 2016.
- [4] V. Diaz, E. Rodriguez, A. Cordero, and M. Moreno, "Sorting of III-V concentrator solar cells as an efficient tool for CPV modules manufacturing," in *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008, pp. 1–4.
- [5] V. Baharwani, N. Meena, A. Dubey, D. Sharma, U. Brighu, and J. Mathur, "Life cycle inventory and assessment of different solar photovoltaic systems," in *2014 POWER AND ENERGY SYSTEMS: TOWARDS SUSTAINABLE ENERGY*, 2014, no. Pestse, pp. 1–5.
- [6] V. D. Rumyantsev, V. M. Andreev, A. V. Chekalin, N. Y. Davidyuk, and N. A. Sadchikov, "HCPV modules of SMALFOC design in versions for PV and PV/T operation," *2014 IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2014*, pp. 2720–2723, 2014.
- [7] N. Gazbour, G. Razongles, C. Schaeffer, and C. Charbuillet, "Photovoltaic power goes green," in *2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG)*, 2016, pp. 1–8.
- [8] G. Salazar Dias and D. Carrion, "Characterization and modeling of the efficiency of photovoltaic systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2580–2586, Aug. 2015.
- [9] Z. Yang, "STUDY ON HCPV POWER FORECASTING MODEL BASED ON GREY NEURAL NETWORK AND MARKOV," pp. 362–365.
- [10] Tsung-Lin Chou, Zun-Hao Shih, Hwen-Fen Hong, Cheng-Nan Han, and Kou-Ning Chiang, "Investigation of the thermal performance of high-concentration photovoltaic solar cell package," in *2007 International Conference on Electronic Materials and Packaging*, 2007, pp. 1–6.
- [11] Y. H. Zou and T. S. Yang, "Optical performance analysis of a HCPV solar concentrator yielding highly uniform cell irradiance," *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 1–11, 2014.
- [12] S. Zimmermann *et al.*, "A high-efficiency hybrid high-concentration photovoltaic system," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 89, pp. 514–521, 2015.
- [13] R. D. Schultz, E. E. Van Dyk, and F. J. Vorster, "The Design of a High Concentrator Photovoltaic Module (HCPV) Centre for Energy Research."

- [14] S. Askins *et al.*, "A manufacturable achromatic fresnel lens for CPV," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2016, vol. 2016–Novem, pp. 0204–0209.
- [15] F. Duerr, Y. Meuret, and H. Thienpont, "Tracking integration in concentrating photovoltaics using laterally moving optics.," *Opt. Express*, vol. 19 Suppl 3, no. May, pp. A207–A218, 2011.
- [16] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, 2011.
- [17] T. Quentin, M. Steinmetz, A. Poppe, and S. Thoms, "Metformin differentially activates ER stress signaling pathways without inducing apoptosis.," *Dis. Model. Mech.*, vol. 5, no. 2, pp. 259–69, Mar. 2012.
- [18] W. J. Stolte, R. A. Whisnant, and C. R. McGowin, "Design, performance and cost of energy from high concentration and flat-plate utility-scale PV systems," in *Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1993 (Cat. No.93CH3283-9)*, 1993, pp. 1292–1297.
- [19] V. Bostan, T. Tudorache, and G. Colt, "Improvement of solar radiation absorption of a PV panel using a Plane low concentration system," in *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2017, pp. 778–781.
- [20] K. Ghosal, D. Lilly, J. Gabriel, S. Seel, B. Fisher, and S. Burroughs, "Semprius module and system results," in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, pp. 3287–3292.
- [21] M. Renzi, M. Santolini, and G. Comodi, "Performance analysis of a 3.5 kWp CPV system with two-axis tracker," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 220–224, 2014.
- [22] F. A. Lindholm, J. G. Fossum, and E. L. Burgess, "Application of the superposition principle to solar-cell analysis," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 26, no. 3, pp. 165–171, Mar. 1979.
- [23] C. N. Kruse, M. Wolf, C. Schinke, D. Hinken, R. Brendel, and K. Bothe, "Impact of Contacting Geometries When Measuring Fill Factors of Solar Cell Current–Voltage Characteristics," *IEEE J. Photovoltaics*, pp. 1–8, 2017.
- [24] S. Yang *et al.*, "4H-SiC Ultraviolet Avalanche Photodiodes With Small Gain Slope and Enhanced Fill Factor," *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–8, Apr. 2017.
- [25] A. H. El Khateb, N. A. Rahim, and B. W. Williams, "Impact of fill factor on input current ripple of photovoltaic system," *2015 Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl.*, vol. 5, no. 3, pp. 120–123, 2015.
- [26] E. F. Fernandez *et al.*, "Calculation of cell temperature in a HCPV module using Voc," *Proc. 2013 Spanish Conf. Electron Devices, CDE 2013*, pp. 317–320, 2013.
- [27] K. Ghosal, B. Fisher, D. Lilly, J. Gabriel, S. Seel, and S. Burroughs, "Ultrahigh Efficiency HCPV Modules and Systems," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 5, pp.

- 1360–1365, 2016.
- [28] M. O'Neill *et al.*, “Space photovoltaic concentrator using robust fresnel lenses, 4-junction cells, graphene radiators, and articulating receivers,” in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2016, pp. 1337–1342.
 - [29] G. Willeke, “High concentration photovoltaics-state-of-the-art and novel concepts,” *Photovolt. Energy Conversion*, 2003. ..., pp. 2841–2844, 2003.
 - [30] V. Garboushian, D. Roubideaux, S. Yoon, and J. A. Gunn, “An evaluation of integrated high-concentration photovoltaics for large-scale grid connected applications,” in *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1996*, 1996, pp. 1373–1376.
 - [31] A. P. S. Rathod, P. Mittal, and B. Kumar, “Analysis of factors affecting the solar radiation received by any region,” in *2016 International Conference on Emerging Trends in Communication Technologies (ETCT)*, 2016, pp. 1–4.
 - [32] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, and A. Masmoudi, “MATLAB / Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell,” *Int. J. Renew. ENERGY Res.*, vol. 2, no. 2, p. 6, 2012.
 - [33] T.-C. Ou, C.-L. Lee, and S.-S. Shyu, “Combine multiple HCPV with BIPV for dc power application at INER,” in *2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE)*, 2009, pp. 1–8.
 - [34] F. Jimenez and D. B. Solé, “Estudio y simulación de sistemas de conversión fotovoltaica-eléctrica mediante Matlab/Simulink,” *Saaei'09*, 2009.
 - [35] R. D. Schultz, E. E. van Dyk, and F. J. Vorster, “The optical design and performance of a concentrator photovoltaic module,” *J. Energy South. Africa*, vol. 26, pp. 53–63, 2015.
 - [36] M. Arboit, P. Arena, and C. de Rosa, “Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 12, 2008. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184,” *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 12, pp. 97–104, 2008.

6.1. Estado del Arte

MODELAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ENTRE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO DE ALTA EFICIENCIA Y UN SISTEMA CONVENCIONAL																											
ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	Caracterización Célula Fotovoltaica	Industria Fotovoltaica	Generación Fotovoltaica de Alta Eficiencia	Factor de Forma	Opciones de Concentración	Energy Pay Back Time	Lente de Fresnel	Parámetros técnicos de los paneles de concentración	Eficiencia de Paneles convencionales	Eficiencia Paneles Concentrados	Pérdidas en Inversores	Análisis del Recurso Solar	Radiación Solar	Temperatura de las Células Fotovoltaicas	Corriente de Cortocircuito	Voltaje en circuito abierto	Modelamiento Panel Convencional	Modelamiento Panel Concentrado	Modelamiento Inversor	Adquisición de Parámetros climatológicos	Cálculo Potencia	Ánàlisis comparativo	Corrección del error	Ingreso de parámetros reales	Potencias Generadas
1	2011	Demonstrating reliability in HCPV systems	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
2	2016	Solar power and application methods	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
3	2016	Numerical simulation and experimental validation of a high concentration photovoltaic / thermal module based on pointfocus Fresnel lens	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
4	2008	Sorting of III-V concentrator solar cells as an efficient tool for CPV modules manufacturing	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
5	2014	Life cycle inventory and assessment of different solar photovoltaic systems	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
6	2014	HCPV modules of SMALFOC design in versions for PV and PV/T operation	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒

35	2015	The optical design and performance of a concentrator photovoltaic module																									
36	2008	Summary for Policymakers																									
			4	13	10	4	6	3	4	3	3	3	2	3	9	2	3	4	3	7	2	4	5	3	5	2	4

Resumen e Indicadores del estado del arte

